

## ESTIMATIVA DE EXPOENTE DE HURST EM REGISTROS SÍSMICOS VIA ANÁLISE WAVELET

Alane Farias dos Santos<sup>1,2</sup>  
Franciscos Edcarlos Alves Leite<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal Rural do Semi-Árido

<sup>2</sup>alanefarias9@gmail.com

<sup>3</sup>edcarlos@ufersa.edu.br

**Resumo:** A invariância na forma geométrica de alguns elementos mantém-se sob a apreciação em escalas diferentes, ainda que, de modo geral, todo o objeto apresente complexidade infinita oriunda de seu processo de formação. Elementos específicos como a geometria Fractal e a Transformada Wavelet foram utilizados nesse trabalho para compor uma análise particular acerca dos padrões observados em imagens sísmicas, onde uma estrutura ruidosa, denominada de “ground roll” está presente. A desordem causada pelo ruído é indesejável e, portanto, sua remoção é indispensável para que haja coerência na interpretação das reflexões exibidas nos sismogramas. A remoção do “ground roll” foi alcançada através do uso da Decomposição em Multiescala com base da Transformada Wavelet. O procedimento produziu diversos padrões sísmicos que correspondem às variações atribuídas as escalas distintas de observação. Neste contexto, este estudo objetiva apresentar a constatação e caracterização de um padrão de correlação (semelhanças) nas imagens sísmicas, cujo procedimento consegue relacionar a Dimensão Fractal com o Expoente de Hurst. A Transformada Wavelet foi também utilizada para calcular o Expoente de Hurst e, assim, foram descritas as dimensões fractais dos padrões obtidos. Por conseguinte, foi possível identificar que existe uma correção para cada tipo de padrão sísmico: a imagem original, a imagem sem ruído e a imagem contendo somente o ruído.

**Palavras-chave:** Transformada Wavelet, Sísmica, Ground Roll, Fractal, Expoente de Hurst.

### 1. INTRODUÇÃO

A identificação de uma área favorável ao acúmulo de petróleo pode ser alcançada através de métodos da prospecção sísmica que viabilizam o processo sem a necessidade de gastos com a escavação de um poço do tipo estratigráfico para possível aferição quanto ao êxito esperado frente a extração de hidrocarbonetos em determinadas áreas. A Sísmica de Reflexão, em seu processo, faz uso de ondas artificiais e controladas dissipam energia na subsuperfície terrestre e diversas informações são extraídas a partir da caracterização quanto à refração e reflexão com o meio. Tem-se, portanto, uma série de dados técnicos a serem analisados, cuja interpretação muito depende do processamento de imagens (THOMAS, 2004).

De acordo com Do Vale (2009) o resultado da interação com o meio pode ser captado partir de uma distribuição regular de geofones (ou hidrofones). Estes são capazes de transmitir as oscilações até o sismógrafo, onde são digitalizadas,

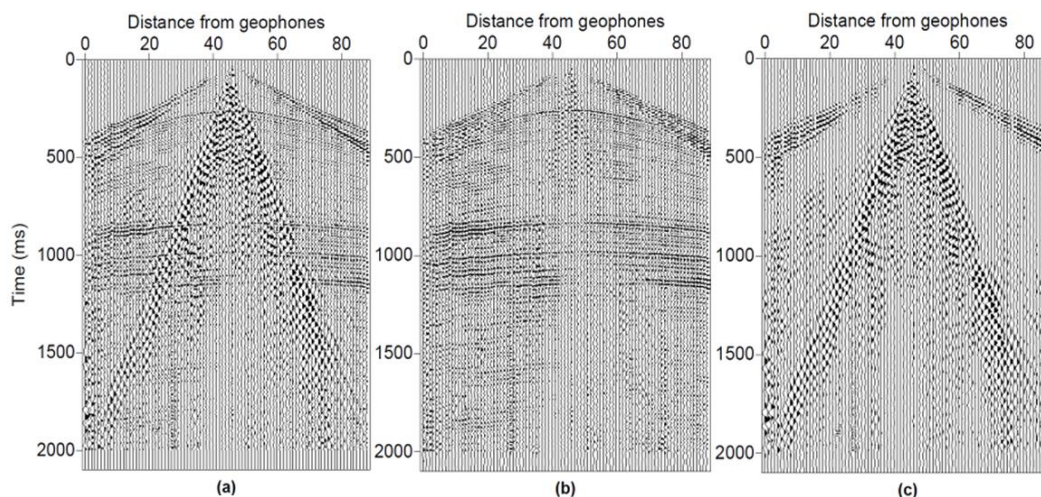
(83) 3322.3222

contato@conepetro.com.br

[www.conepetro.com.br](http://www.conepetro.com.br)

multiplexadas e registradas após severo depuramento e amplificação (THOMAS, 2004). Com essa formatação é possível construir uma imagem sísmica (Sismograma) do subsolo terrestre, a qual pode ser vista na Figura 1 a representação em 2D (YILMAZ, 2003).

Figura 1 – Registros sísmicos (a) original, (b) após a atenuação do ruído *ground roll* e (c) com apenas a porção do *ground roll* que foi removida do registro original.



A resolução da imagem obtida pelo sismograma está diretamente relacionada com a frequência e com a duração do pulso sísmico, os quais dependem do tipo de equipamento utilizado e também do tipo da fonte geradora de energia. Para que o risco de interpretação equívoca seja reduzido, tudo que não é identificado como reflexão primária é considerado ruído e, assim, pode ser removido ou atenuado.

Uma das grandes preocupações na prospecção sísmica terrestre é a presença do ruído coerente *ground roll*, que está diretamente relacionado com a propagação de ondas superficiais do tipo Rayleigh, possuindo como características baixas frequências e altas amplitudes, o que o torna bastante indesejável. Por ser bastante energético, acaba mascarando as reflexões de interesse geológico (SANTOS, 2014).

Sob essas circunstâncias, optou-se por fazer uso da análise de wavelet, que é capaz de revelar aspectos singulares que outras técnicas de análise de sinais não denotam, como as tendências, pontos de ruptura, descontinuidades em derivadas mais elevadas e auto-similaridade. Além disso, pode-se comprimir ou atenuar ruídos de sinais e imagens sem distorção apreciável. Sendo possível também ter o controle eficaz das rotinas de processamento, análise e filtragem na prospecção sísmica com base no conhecimento da geologia do reservatório (DEIGHAN, 1997), (CORSO et. al, 2003), (LEITE, 2007).

Para a atenuação do ruído *ground roll* das imagens sísmica foi utilizado o método da Decomposição em Multiescala, em que passou a existir uma imagem sísmica para cada escala da decomposição em wavelets utilizada no processo.

Um avanço na pesquisa do autor foi passar a calcular o Expoente de Hurst através da Transformada em Wavelets, para que se possa aferir sobre a Dimensão Fractal de alguns padrões de interfaces geológicas presentes nas imagens.

### 1.1 Transformada Wavelet

Da necessidade de ser obter análise em localização espaço-temporal das estruturas de frequências, foram desenvolvidas as funções wavelets para atuarem como funções de base na decomposição de funções do domínio temporal para o domínio dual tempo-escala (GURGEL, 2013). Os parâmetros da Transformada Wavelet permitem fazer uma varredura que se ajusta as características dos sinais, a partir de uma janela de análise variável, criada para localização de frequências específicas em cada trecho do sinal.

#### 1.1.1. Transformada Wavelet Discreta

De acordo com Daubechies (1992), a Transformada Wavelet pode ser implementada através da discretização dos parâmetros de escala  $s$  e localização temporal  $u$ . Dessa forma, uma base formada por wavelets discretas pode ser construída com a escolha de  $s = 2^j$  e  $u = n2^j$  com  $j$  e  $n$  inteiros. Cada valor de  $2^j$  é uma resolução na escala e  $j$  o índice de escala ou índice de resolução. Dessa forma, a correspondente wavelet discreta  $\psi_{j,n}$  é definida como:

$$\psi_{j,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \psi \left( \frac{t-n2^j}{2^j} \right) \quad [1]$$

e a transformada wavelet discreta é dada por:

$$d_{j,k} = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \left( \frac{t-n2^j}{2^j} \right) dt \quad [2]$$

onde  $j$  e  $n$  são parâmetros inteiros associados com as dilatações e translações temporais da wavelet, respectivamente. Nesse sentido, existe uma base de wavelets discretas  $\{\psi_{j,n}\}$  tal que, uma função  $f(t)$  pode ser expandida como uma combinação linear das funções dessa base:

$$f(t) = \sum_j \sum_n d_{j,n} \psi_{j,n}(t) \quad [3]$$

onde  $d_{j,n}$  são os coeficientes da transformada wavelet discreta da função  $f(t)$ , os quais são calculados por fazer o produto interno da função  $f(t)$  com as funções de base wavelets  $\psi_{j,n}$ . Esses coeficientes nos dão informações sobre o comportamento da função  $f(t)$  na resolução dual de escala  $2^j$  e tempo  $2^j n$ .

### 1.2 Fractal

Os Fractais apresentam três características principais: auto-semelhança ou invariância por escalas, uma complexidade infinita e dimensão fractal. Entre estas, a característica de aferição é a relacionada à sua dimensão fractal ( $D$ ) e que nos diz informações sobre sua complexidade e auto-semelhança. Esse conceito de fractais nos possibilita uma concepção mais ampla para o dimensionamento de algumas propriedades relacionadas aos objetos: o grau de aspereza, rugosidade, fragmentação, irregularidade.

Para entendermos a dimensão fractal ( $D$ ) de objetos vamos considerar que um objeto é constituído de  $N$  objetos em uma escala menor  $S$  onde estes constituem o objeto maior. Usando a relação proporcional da sua escala  $S$  elevado a um expoente  $D$ :

$$N = S^D \rightarrow D = \frac{\log(N)}{\log(S)} \quad [4]$$

onde  $D$  é a dimensão fractal.

### 1.3 Expoente de Hurst

Diversas observações naturais são compostas por registros em determinado intervalo de tempo. A sequência de todas essas medidas constitui uma série temporal, que é formada por um conjunto de observações ordenadas sequencialmente ao longo do tempo. Essas séries periodicamente exibem flutuações e comportamento imprevisível independente das escalas de tempo. Tais flutuações geralmente são analisadas a partir do cálculo da correlação entre as suas medidas. Neste sentido, a medida do expoente de Hurst ( $H$ ) de uma série temporal nos fornece informações sobre o tipo de correlação presente na série (RÊGO, 2012).

A dimensão fractal  $D$  está relacionada com o Expoente de Hurst  $H$  de acordo com a seguinte expressão matemática:

$$D = 2 - H \quad [5]$$

Neste caso, a dimensão fractal pode assumir valores não-inteiros. Quanto menor é expoente de Hurst  $H$ , mais a dimensão fractal se aproxima de dois e o perfil se torna menos rugoso.

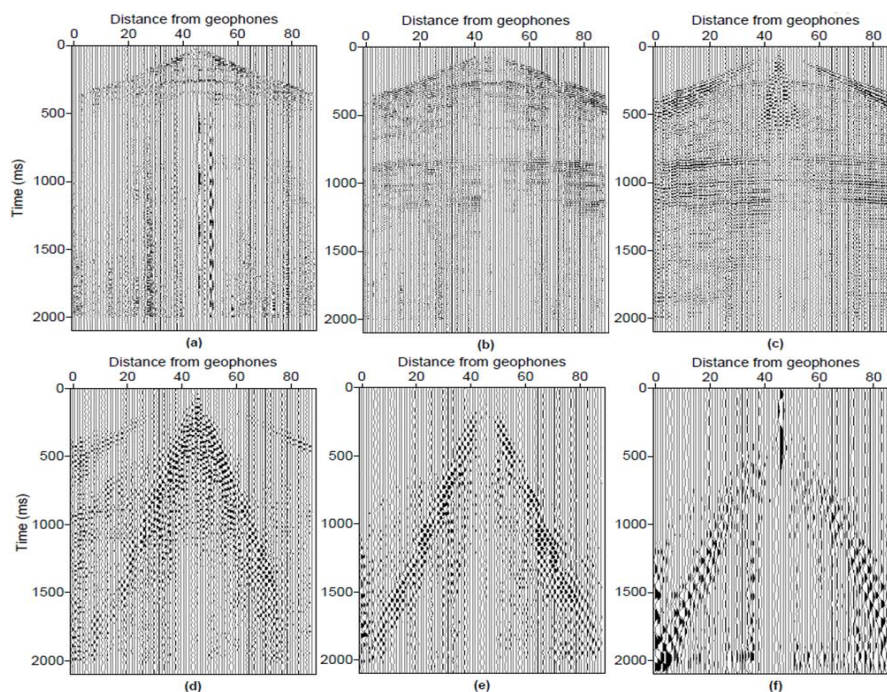
## 2. METODOLOGIA

A metodologia aqui utilizada é caracterizada em três etapas principais: (i) processamento do dado sísmico original utilizando a Transformada Wavelet; (ii) atenuação do ruído “ground roll” dos registros sísmicos e (iii) análise da dimensão fractal dos dados sísmicos para aferir e evidenciar possíveis correlações das estruturas geológicas. As medidas das correlações são obtidas através dos expoentes de Hurst, os quais foram calculados usando a transformada wavelet discreta. Em seguida, os expoentes de Hurst são analisados juntamente com a dimensão fractal.

O registro sísmico original (sismograma em 2D) aqui analisado para se alcançar o objetivo deste trabalho (Figura 1(a)) representa o registro de um levantamento sísmico realizado em terra. Como se pode ver nesta figura, o registro sísmico é composto de 89 traços sísmicos e 2100 leituras (amostras temporais) por cada traço. No entanto, o registro sísmico é uma matriz  $M \in \mathbb{R}^{m \times n}$  cuja ordem atribuída é de 2100x89.

A decomposição deu origem aos padrões observados na Figura 02, onde existem diferenças quanto às amplitudes e frequências. Nesse sentido, pode-se dizer que ela representa uma distribuição da energia do sismograma e cada padrão está relacionado com o particionamento da energia nas interfaces do meio geológico.

Figura 2 – Padrões sísmicos gerados através da Decomposição Multiescalas. Padrões para as escalas (a) primeira, (b) segunda, (c) terceira, (d) quarta, (e) quinta e (f) da sexta à décima primeira.



A metodologia utilizada para calcular os expoentes de Hurst dos registros sísmicos é através do método do Espectro de Energia da Wavelet descrito pela equação [6]. Para os registros sísmicos aqui analisados esta relação é caracterizada pela auto-similaridade dos registros sísmicos.

## 2.1 Calculando o Expoente de Hurst usando a Transformada Wavelet

De acordo com Sahimi (2003), o Espectro de Energia da Wavelet identifica as escalas dominantes em uma série/função e fornece a melhor medida da variância de um conjunto de dados porque os coeficientes wavelets são influenciados por eventos locais. Isso posto, para cada nível de escala o espectro é definido como sendo:

(83) 3322.3222

contato@conepetro.com.br

[www.conepetro.com.br](http://www.conepetro.com.br)

$$E(j) = \sum_k |d_{j,k}|^2 \quad [6]$$

onde  $j$  corresponde ao nível de escala da decomposição wavelet e  $k$  é o parâmetro de translação da wavelet. A estimativa do expoente de Hurst é dada pela regressão linear da variância  $\sigma^2(j)$  do espectro de energia wavelet de acordo com a relação matemática:

$$\log[\sigma^2(j)] = (2H + 1)j + \text{constante}. \quad [7]$$

Então, a inclinação da reta de  $\log[\sigma^2(j)]$  pelo nível de escala  $j$  nos fornece o expoente de Hurst  $H$ .

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Mediante os resultados obtidos em outros trabalhos de mesma autoria, o foco deste é detalhar somente aos resultados quanto à análise fractal dos registros sísmicos cujas estimativas do expoente de Hurst foram calculados através da transformada wavelet discreta, como seguem os comportamentos observados nas Figuras 3 e 4.

Figura 3 – Expoente de Hurst  $H$  para cada traço completo dos registros sísmicos da Figura 1(a) à (c). Registro sísmico (Preto) original, (Verde) sem o ruído *ground roll* e (Azul) porção removida do original.

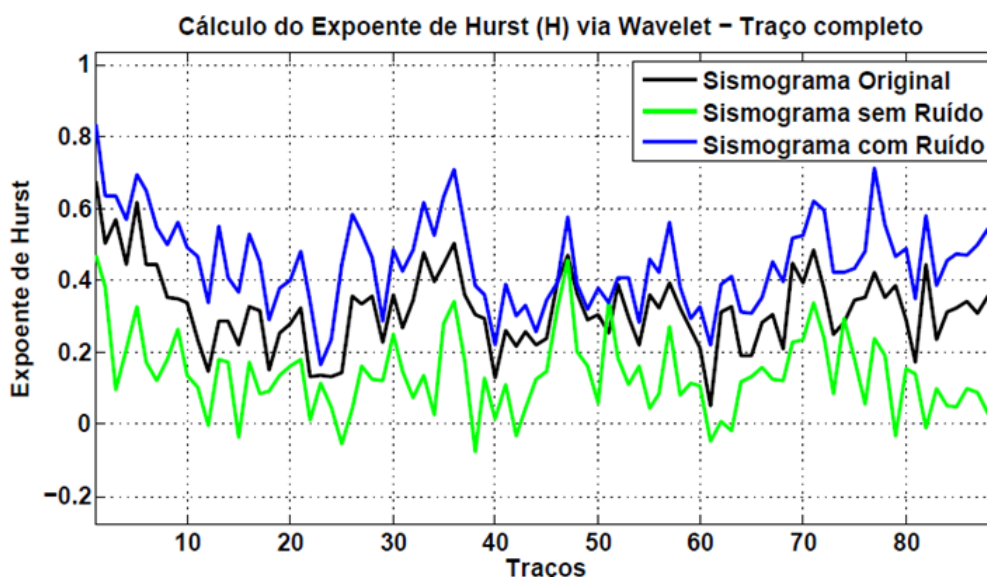
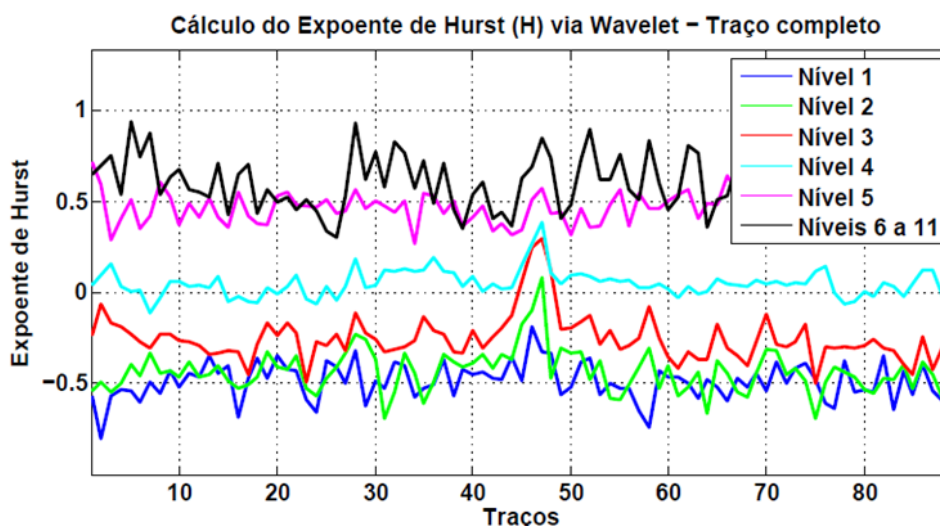


Figura 4 – Expoente de Hurst  $H$  calculado para cada traço completo dos registros sísmicos representados na Figura 2(a) até (f).



É mostrada na Figura 3 a dinâmica dos expoentes de hurst  $H$  para cada traço dos três registros sísmicos mostrados na Figura 1. Podemos perceber que os valores para os expoentes de hurst são maiores para a curva que representa a maior evidência do ruído *ground roll* (em azul). Os valores menores são expressos na curva que contempla o registro com atenuação do ruído *ground roll* (em verde). Ainda na Figura 3, percebemos que a dinâmica do expoente de hurst apresenta um comportamento semelhante para o registro sísmico original (cor preta) e com o registro sísmico onde o *ground roll* é predominante (cor azul). Já para o registro sísmico sem a presença do ruído *ground roll* a dinâmica do expoente de hurst (cor verde) apresenta dinâmica inversa. Essas mesmas características já foram obtidas no trabalho anterior (Santos e Leite, 2015), porém, agora as variações são mais regulares, isto é, a discrepância é menor. Isto se deve a regularização da distribuição de energia para os coeficientes da transformada wavelet.

A nossa análise também foi testada para os padrões sísmicos mostrados na Figura 2((a) até (f)), representados pela Figura 4. Neste diagnóstico, podemos observar que a dinâmica de correlação para os expoentes de hurst torna-se mais evidente com valores menores para os primeiros níveis de escalas ou níveis de escalas mais baixo. Podemos verificar que os valores do expoente de hurst  $H$  são maiores para os níveis e escalas maiores, os quais estão representados pela linha preta. Isto se torna evidente quando analisamos que o ruído *ground roll* é caracterizado por um espectro de energia mais forte, isto é, os coeficientes das wavelets são mais fortes em padrões muito ruidosos. Já o menor nível de escala apresenta expoentes de hurst menores, os quais estão representados pela linha azul na Figura 4. As variações para os valores de  $H$  são menores ainda. Isto se caracteriza pelo fato de que o espectro de energia wavelet torna-se mais evidente em eventos com variações mais localizadas, uma vez que o espectro de energia, para este caso, foi calculado para cada nível de escala.

#### 4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos com o desenvolvimento deste trabalho mostraram que metodologia se mostrou extremamente eficiente. Uma vez que a transformada wavelet decompõe o registro sísmico em níveis de escalas diferentes, então esta ferramenta é adequada para análise de eventos que apresentam autosimilaridades. Além disso, a transformada wavelet discreta consegue apurar

resultados quanto ao espectro de energia, permitindo a identificação das correlações dominantes, como denotado que, para este trabalho, existem correlações entre o registro sísmico original, o registro sísmico sem o ruído “ground roll” e registro sísmico que apresenta o *ground roll* como sinal predominante.

## REFERÊNCIAS

ALVES, F. M., *Atenuação do ground roll utilizando filtragem adaptativa com filtros tipo wiener-levinson antissimétricos e decomposição em modos empíricos*. 2013. 52p. Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Geofísica do Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia. Salvador/BA.

CORSO, G.; KUHN, P. S.; LUCENA, L. S.; THOME, Z. D. *Seismic Ground Roll Time-Frequency Filtering using the Gaussian Wavelet Transform*. Physica A, v. 318, p. 551-561. DAUBECHIES, I. *Ten Lectures on Wavelets*. Society for Industrial and Applied Mathematics. Philadelphia, 1992.

DEIGHAN, A. J.; WATTS, D. R. *Ground-roll suppression using the wavelet transform*. Geophysics, v. 62, p.1896-1903, 1997.

DO VALE, M. L. C., *Análise de sinais geofísicos na prospecção de petróleo*, 2009, 54p. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociência. Recife/PE.

GURGEL, V. C., *Aplicação de Técnicas Wavelets em Análise de Séries Temporais para Detecção de Correlações*. 2013. 64p. Trabalho de Conclusão de Curso, Curso de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Angicos/RN.

LEITE, F. E. A. *Análise Estatística de Padrões Sísmicos: Decomposição em Multiescala*. 2007, 135p. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Física. Natal/RN

MALLAT, S. *A Wavelet Tour of Signal Processing*, Academic Press, New York, 1999. SAHIMI, M. *Large-Scale porous Media and Wavelet Transform*. Computer Simulations, 2003.

SANTOS, A. F.; LEITE, F. E. A. *Estimativa do Expoente de Hurst em Dados Sísmicos Utilizando Análise Fractal*. In: Congresso Nacional de Engenharia de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - CONEPETRO, 2015, Campina Grande - PB. Anais CONEPETRO, 2015. v. 01.

SANTOS, A. S., *Atenuação do ground roll utilizando a filtragem radial*. 2014, 53p. Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Geofísica do Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia. Salvador/BA.

THOMAS, J. E. *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*. Interciência, 2004.

YILMAZ, O. *Seismic Data Processing*. Society of Exploration Geophysicists (SEG), Tulsa (USA), 2003.